

张萍萍,林修栋,张莉萍,等.一次TS型线状对流不同阶段LMI闪电特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):100-107.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



一次TS型线状对流不同阶段LMI闪电特征分析

张萍萍^{1,2},林修栋²,张莉萍²,连帆²,刘文婷³

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.威海市气象局,山东 威海 264200;

3.武汉中心气象台,湖北 武汉 430074)

摘要:本文以2019年一次尾随层状(TS)型线状对流为研究个例,利用FY-4A闪电成像仪(LMI)资料、雷达组合反射率因子资料、地基闪电定位资料(ADTD)、FY-4A云顶亮温资料(TBB)和其他常规观测资料,对比分析了LMI闪电数据在TS型线状对流3个不同演变阶段的数据可靠性及观测特征。结果表明:TS型线状对流不同演变阶段的LMI闪电观测具有一定的时空连续性,LMI闪电分布与ADTD闪电分布的区域总体较为一致;对流发展阶段,LMI闪电观测位置略超前于TS型线状对流前导对流线,对未来0~1 h内对流发展具有提前指示意义;对流成熟阶段,LMI闪电观测与前导对流线位置较为一致,对线状对流发展具有监测意义;对流减弱阶段,LMI闪电一部分位于减弱的前导对流线中,另一部分位于其后侧尾随的积层混合云中。最后,给出了本次TS型线状对流不同演变阶段LMI闪电观测特征模型图,为LMI闪电产品在对流天气监测预警中的应用提供一定参考。

关键词:闪电成像仪;线状对流;监测预警

中图分类号:P458.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)02-0100-08

闪电是指发生在不同极性电荷之间的放电现象,瞬间释放出来的能量具有强大破坏力^[1-2]。闪电的发生通常与中尺度对流系统形成发展相伴随,其中线状中尺度对流系统影响过程中闪电活动非常活跃,危害不容忽视^[3-4]。目前闪电资料观测方式主要有地面闪电观测和卫星闪电观测方式,地面闪电观测基于电磁场探测原理,统计云的散射和吸收在放电过程中闪击的次数^[5]。我国地面闪电观测系统主要有国家级闪电定位系统(Active Directory Topology Diagrammer, ADTD)、电力部门闪电定位系统(Lighting Location System, LLS)等^[2];卫星闪电观测采用光学成像探测原理,探测云顶闪电放电过程中

产生的辐射信号,分为极轨卫星观测和静止卫星观测。极轨卫星中的闪电探测仪以TRMM卫星携带的LIS(Lighting Imaging Sensor)为代表,静止卫星则以FY-4A LMI(Lighting Mapping Imager)和美国的GOES-R卫星的GLM(Geostationary Lightning Mapper)为代表^[2]。极轨卫星闪电成像仪只能提供区域平均范围的闪电分布信息,而静止卫星闪电成像仪可实时、连续监测闪电活动,实现对闪电的分钟级、长时间连续光学探测^[6-7]。2016年12月11日,我国新一代静止轨道气象卫星风云四号A星(FY-4A)发射升空,该卫星搭载的闪电成像仪(Lightning Mapping Imager, LMI)是我国第一次自主研制的星载闪电成像仪^[8],能够实现对强对流天气的连续监测,在强对流天气预警方面具有很好的应用前景。

在FY-4A LMI闪电数据应用的过程中,一些学者对LMI数据的可靠性进行了分析。邹耀仁等^[9]对

收稿日期:2023-01-11;修回日期:2023-04-11

基金项目:山东省气象局基金项目(2021SDYD36)

作者简介:张萍萍(1980—),女,正高级工程师,主要从事极端降水、卫星资料应用分析研究。E-mail: zpp7117@126.com

黄渤海一次雷电过程中的地基闪电观测与 LMI 闪电观测进行对比,发现二者的空间位置比较一致。曹冬杰等^[10]发现地基闪电数据和 LMI 闪电数据反映的闪电密度高值区较为一致。支树林等^[11]对一次台风飊线过程 LMI 闪电与地基闪电产品进行对比,发现二者的时间变化及其表征出的对流云尺度均相似。Hui 等^[12]将青藏高原上 LMI 与 TRMM 卫星上搭载的 LIS 数据进行对比,发现二者观测的闪电频次空间分布较为一致。以上分析均表明 FY-4A LMI 闪电资料的空间分布与地基闪电资料在总体趋势上一致,因此 LMI 产品在实际天气分析中具有适用性。

还有一些学者对 LMI 闪电资料在对流天气监测及预警中的作用进行了分析。林小红等^[13]指出 FY-4A LMI 闪电频次的时空变化与台前飊线的演变过程一致,能起到一定的监测作用。张晓芸等^[14]指出 LMI 闪电强度与雨强相关性较好,闪电频数峰值经常出现在降水峰值前 45 min 左右,对降水发展演变具有一定的提前指示作用。王清平等^[15]发现风云四号卫星的闪电观测数据对强对流云团的分布有较好的识别效果。任素玲等^[16]指出闪电成像仪产品对新生对流和较弱对流产生的闪电监测具有优势。徐国强等^[17]将 LMI 闪电数据引入到 GRAPES_Meso 模式的云分析系统中,发现 LMI 闪电事件对强降水有较好的指示作用。

综上可见,LMI 闪电产品在对流天气监测及预警应用方面具有一定的优势,也开展了一些相关研究,但是目前关于 LMI 闪电产品在线状对流系统演变过程中的特征研究等较少。基于此,本文利用 FY-4A 闪电成像仪资料、雷达组合反射率因子资料、地基闪电定位资料(ADTD)、FY-4A 云顶亮温资料(TBB)和其他常规观测资料,对 2019 年 5 月 25 日湖北省一次尾随层状云(Trailing Stratiform,简称 TS)线状对流系统演变过程中,不同阶段 LMI 闪电观测的不同特征开展研究,以期 LMI 闪电资料在对流天气监测和预警中的应用提供更为科学的参考依据。

1 数据和方法

1.1 闪电数据

本文的卫星闪电数据来自 FY-4A LMI L2 级 1 min 探测产品。LMI 闪电成像仪采用 CCD 面阵和光学成像技术,对观测区域内包括云闪、云间闪、云—地闪在内的总闪电进行凝视观测,实现对雷暴系统的实时、连续监测和跟踪,为强对流天气监测、

民航、铁路、电力等行业安全保障等提供服务。其中 CCD 面阵大小为 400×600,成像速率为 500 帧/秒,中心波长为 777.4 nm,星下点空间分辨率为 7.8 km,总视场角为 4.98°(南北)×7.41°(东西)。

本文所使用的地基闪电数据来自我国气象部门国家雷电监测网的探测数据。采用 ADTD (Advanced TOA and Direction system) 闪电探测系统,针对有效闪电回击数据,获取雷电发生时间、地理位置等^[18]。

1.2 雷达数据

本文使用的雷达反射率因子数据为 SWAN (Severe Weather Automatic Nowcast System) 组合反射率因子图^[9],数据间隔为 6 min,空间分辨率为 0.01°×0.01°。多普勒雷达观测是目前监测对流系统发生发展的有效手段之一^[20-21],因此本文主要利用雷达组合反射率因子的演变作为线状对流系统发展变化的主要依据。

1.3 云顶亮温数据

本文所使用的云顶亮温 TBB 数据来自 FY-4A 辐射成像仪(AGRI)波段 12(波长为 10.8 μm)L1 级数据,空间分辨率为 4 km,时间分辨率为 5 min。本文基于 TBB 数据,将 240 K 作为对流阈值,当 TBB≤240 K 时,代表可能有对流云产生^[22]。

1.4 多源数据时间匹配方法

本文以雷达观测资料的时间分辨率为基准,以 6 min 作为时间步长,依据最邻近原则,分别将 LMI 数据、ADTD 数据和 TBB 数据处理成 6 min 的时间步长。

2 结果与分析

2.1 天气实况及线状对流演变

2019 年 5 月 25 日 08 时—26 日 08 时,受低涡切变线和冷空气共同影响,湖北省中东部出现了一次明显的线状对流过程。受其影响,江汉平原及鄂东地区出现了大范围的短时强降水(图 1a),最大小时雨强达 81.2 mm(潜江县渔洋站)。该过程影响系统复杂,产生了多条线状对流,本文以一条产生降水强度最大的线状对流作为主要研究对象(111°~114.5°E,29°~31.5°N),该线状对流从生成到减弱消亡的时间段为 5 月 25 日 17 时—26 日 02 时,移动路径如图 1a 所示。参考 Parker 等^[23]和王晓芳等^[24]关于线状对流分类方法,依据线状对流回波组织形态及演变特征,发现该线状对流的发展过程中,线状对流移动前侧有新单体生成,即向前传播形成前导对流线,其

后侧出现大范围层积混合云降水回波,因此判定该线状对流属于尾随层状(TS)型线状对流。依据雷达回波形态、强度随时间的变化,将此线状对流分为3个阶段:发展阶段(25日17:00—20:00)、成熟阶段(25日20:00—22:00)、减弱阶段(25日22:00—26日02:00),从线状对流影响区域短时强降水站数和最大小时雨强随时间变化可以看出(图1b),短时强降水站数和最大小时雨强在第一阶段呈现上升趋势,第二阶段达到最大峰值,第三阶段呈现下降趋势。

2.2 对流发展阶段 LMI 闪电观测特征

5月25日17:00—20:00为TS型线状对流的发展阶段。从图2可看出在研究区域内出现了南北两条线状对流,由于南部的线状对流呈现明显的发展趋势,且产生的短时强降水强度较大,因此以该线状对流作为主要研究对象(黑色框)。从线状对流形态及演变可看出,强的回波位于系统移动的前方,反射率因子梯度在对流线的前缘比后方要强,对流线的后方为层积混合云区,判断该线状对流为尾随层状(TS)型线状对流。由于该线状对流呈现向东移动趋势,认为在线状对流所在区域及其东侧靠近区域的LMI闪电可能与其相关联(蓝色框),将其作为

LMI闪电研究对象。由18:06雷达回波与同时刻LMI闪电活动的空间分布(图2a)可知,LMI闪电分布靠近线状对流前侧对流线,一部分闪电位于对流线主体东侧,雷达反射率因子值为20~30 dBZ,局部超过30 dBZ。随着线状对流的发展,18:30、19:00(图2b~2c),LMI闪电观测出现同样的特征,LMI闪电分布区域并不全部分布在对流线上,部分LMI闪电分布略超前于线状对流,位于其移动前方反射率因子值为10~30 dBZ。

出现这种现象可能存在两种原因:一是线状对流主体前侧的LMI闪电为虚假闪电信号;二是位于线状对流主体前侧的LMI闪电为真实闪电信号。为分析线状对流发展阶段位于其移动前方的LMI闪电是否为虚假信号,用两种方法进行判断:由于地基ADTD数据能够观测到由对流系统产生的地面闪电特征,红外云顶亮温TBB数据与对流演变关系密切,因此首先将LMI闪电与ADTD闪电、TBB数据进行对比,分析同时刻三者分布特征;其次,由于真实闪电具有一定的时间连续性,能够将对流发展起到一定的指示意义^[25],因此可以通过对LMI闪电跟踪,分析其将对流发展的指示作用,判断其是否为真实闪电信号。下面本文将依次选取这两种方法进行

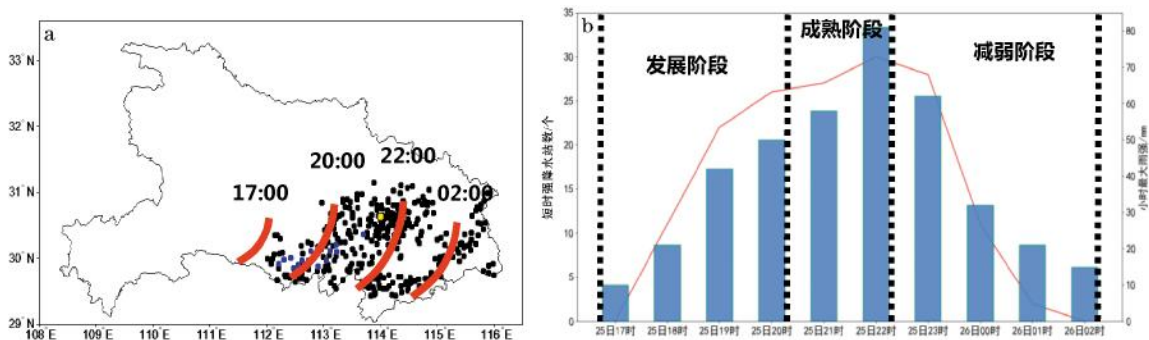


图1 2019年5月25日08时—26日08时短时强降水落区(a,黑色方形为小时雨强20~50 mm,蓝色方形为小时雨强50~80 mm,黄色方形为小时雨强>80 mm,红色实线为不同时刻线状对流的位置),及线状对流影响区域短时强降水站数和最大小时雨强随时间变化(b)

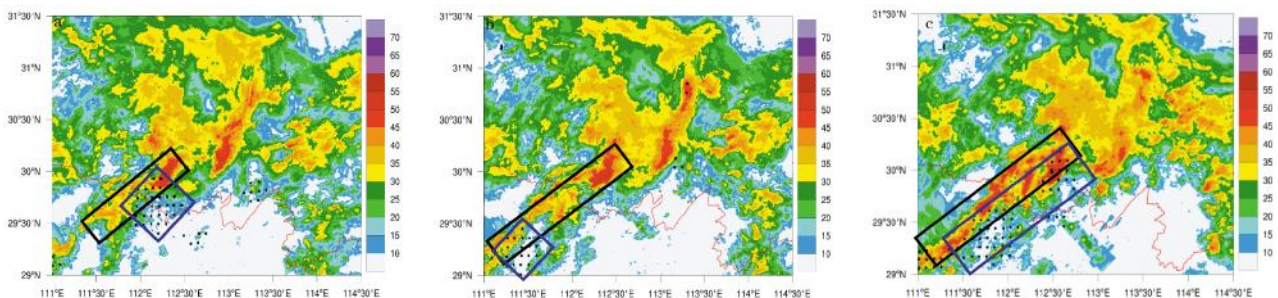


图2 雷达反射率和LMI闪电分布

(a为18:06,b为18:30,c为19:00;阴影表示雷达反射率,黑色圆点表示LMI闪电,黑色方框表示线状对流主体分布区域,蓝色方框表示LMI闪电分布区域)

LMI 闪电信号的虚假判断。

分别选取 18:06 和 19:00 进行 LMI 闪电、ADTD 闪电和红外云顶 TBB 数据的叠加(图 3),可以发现 18:06 LMI 闪电活动内(蓝框)的北部区域存在 ADTD 闪电(图 3a),说明该区域 LMI 闪电分布为真实闪电可能性较大,蓝框南侧虽然没有出现 ADTD 闪电,但是 TBB 数据大部低于 240 K,表明该处有对流云产生,证明该时刻研究区域内的 LMI 闪电为真实闪电的可能性较大;进一步验证 19:00 LMI 闪电数据的真实性。从图 3b 可看出,在 LMI 闪电观测区域北端(A 处蓝框),LMI 闪电与 ADTD 闪电的位置分布较为一致,内 TBB 数据 ≤ 240 K,所以该处 LMI 闪电可能为真实闪电信号。在 LMI 闪电观测区域南端(B 处蓝框),LMI 闪电数据分布区域的 TBB 值大于 240 K,数值在 240~250 K,属于层状云和对流云混合云区,同时发现有一部分 ADTD 闪电数据与 LMI 闪电重合。有关文献指出^[26],闪电有可能发生在中尺度对流系统前方层状云和对流云混合云区,对对流有很好的提前指示作用。综上,推断该区域内 LMI 闪电可能为真实闪电。

根据顾媛等^[27]对南京一次雷雨天气的研究,闪

电能够对回波的未来移向有指示意义,为验证本次过程 LMI 闪电能否对未来回波发展有提前指示意义,分别将 18:06 和 19:00 的 LMI 闪电与未来 1 h 内 19:00 和 20:00 的线状对流主体对应的雷达组合反射率因子演变进行对比。发现 18:06 LMI 闪电出现区域,54 min 后(19:00),雷达组合反射率因子强度由初时刻 20 dBZ 增强至 50 dBZ(图 4a),回波向着初时刻(18:06)LMI 闪电指示区域(蓝框)进行移动和增强。由 19:00 LMI 闪电与 20:00 的雷达组合反射率因子进行对比发现,雷达回波同样向着初时刻 LMI 闪电指示的方向发展(图 4b)。由此判断对流发展阶段,位于对流主体前侧的 LMI 闪电并不是没有意义的虚假信号,而是能引导对流系统发展和演变的有意义的客观观测数据。

为什么在对流发展阶段,LMI 闪电没有出现在对流核心区,而是出现在线状对流主体前侧较低反射率因子区呢? 陈英英等^[28]指出:在对流发展阶段,会出现对流云体在垂直方向上向移动方向倾斜和伸展的现象。孙哲等^[29]指出:在雷暴的发展阶段,闪电可能发生在雷暴云伸展方向的一侧,位于雷达反射率因子强回波区的外围,具有引导雷达回波的作用。

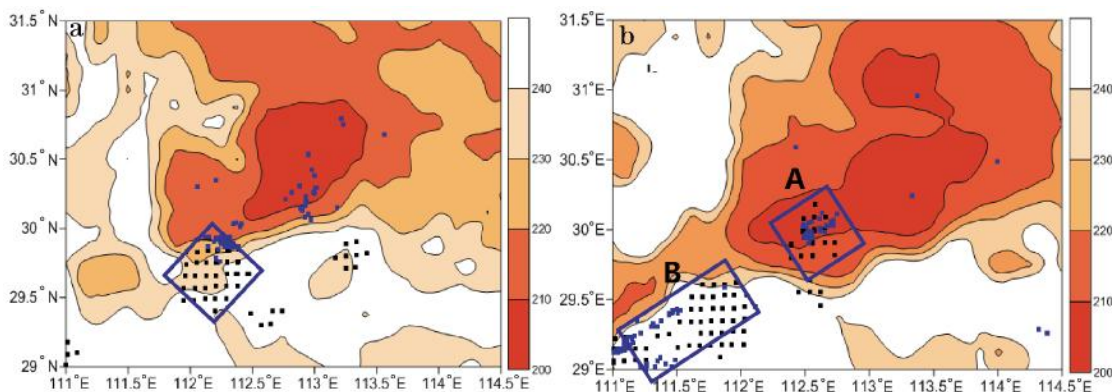


图 3 LMI、ADTD 与 TBB 叠加

(a 为 18:06, b 为 19:00; 黑点表示 LMI 闪电, 蓝点表示 ADTD 闪电, 阴影表示 TBB , 蓝色方框表示 LMI 闪电分布区域)

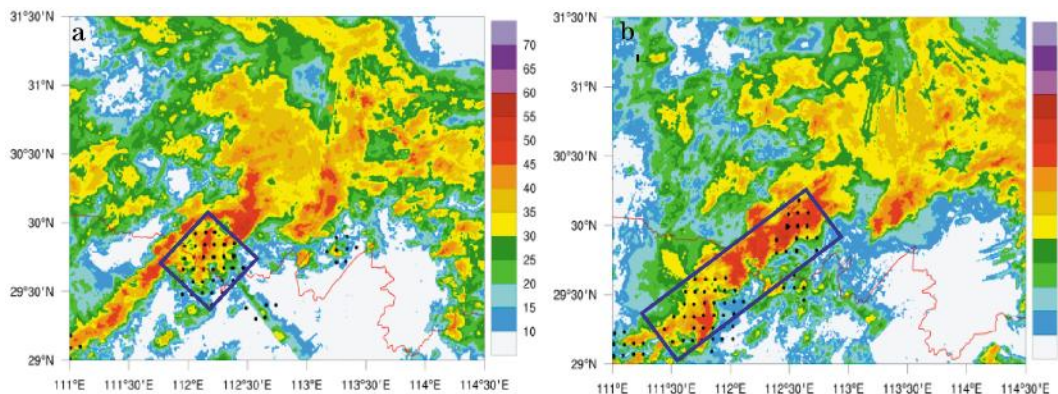


图 4 LMI 闪电(18:06)与雷达反射率(19:00)(a)和 LMI 闪电(19:00)与雷达反射率(20:00)(b)

(黑点表示 LMI 闪电, 蓝色方框表示初始时刻 LMI 闪电分布区域)

这是因为在对流发展阶段, 风暴体前部强烈的上升气流与云内强下沉气流共同作用, 使得云内过冷水滴与雹粒剧烈碰撞, 表面形成冰壳, 在此过程中释放潜热, 使冰壳内部增温, 形成外冷内热的温度差, 从而使冰壳带正电, 内部带负电, 随后冰壳内部不断冻结, 体积膨胀, 最终冰壳破裂, 冰屑飞溅出去, 飞溅出去的冰屑带正电, 导致有一部分地闪可能落在远离强回波中心的区域。

2.3 对流成熟阶段 LMI 闪电观测特征

5月25日20:00—22:00为TS型线状对流的成熟阶段, 选取20:18和21:18研究LMI闪电分布特征。图5a、5b分别给出了20:18和21:18的雷达回波与LMI闪电空间分布图, 可以看出位于江汉平原一带的线状对流逐渐发展成熟, 与之相对应的LMI闪电活动变得空间连续, 分布范围与线状对流前侧的对流主体较为吻合, 从20:18和21:18 LMI闪电、ADTD闪电及TBB分布叠加图看出(图5c), 大部分LMI闪电与ADTD闪电分布密集区较为一致, 位于 $TBB \leq 240$ K的对流云中。由此判断对流发展成熟阶段的LMI闪电为真实闪电信号的可能性较大, 与线状对流主体分布区域较为重合, 均位于 $TBB \leq 240$ K的对流云中, 这个特征与对流发展阶段LMI闪电位于线状对流移动前侧的特征明显不

同。

为什么在对流成熟阶段LMI闪电没有出现在对流主体前侧, 而是与对流主体有较好的对应关系呢? 原因可能是雷暴成熟阶段下沉气流剧烈, 下沉气流将雹块等降水粒子带到高度较低的地方, 由于温度较高使得粒子表面融化, 形成外热内冷的温度差, 使得粒子表面带负电, 内部带正电, 在融化的过程中, 粒子表面会形成气泡, 气泡破裂时使粒子表面的一部分负电荷飞溅出去, 余下部分带正电荷, 由于成熟阶段风切变不强烈, 分离的电荷不容易被带到远离强回波区的位置, 因此闪电聚集在了强回波区及其附近区域^[29]。

2.4 对流减弱阶段 LMI 闪电观测特征

5月25日22时—26日02时是此次过程TS型线状对流的减弱阶段。从5月25日23:36和26日00:30的雷达反射率演变可知(图6), 江汉平原南部的线状对流主体移动到了鄂东南地区(A区), 对流系统分裂, 结构逐渐变得松散, 强度逐渐减弱, 在线状对流减弱的过程中, 对流线的后侧出现大片的层积混合云区(B区)。LMI闪电有一部分分布在减弱的A区对流带中, 还有一部分位于对流系统后侧B区积层混合云中。图6c、6d分别给出5月25日23:36和26日00:30 LMI闪电、ADTD闪电和TBB

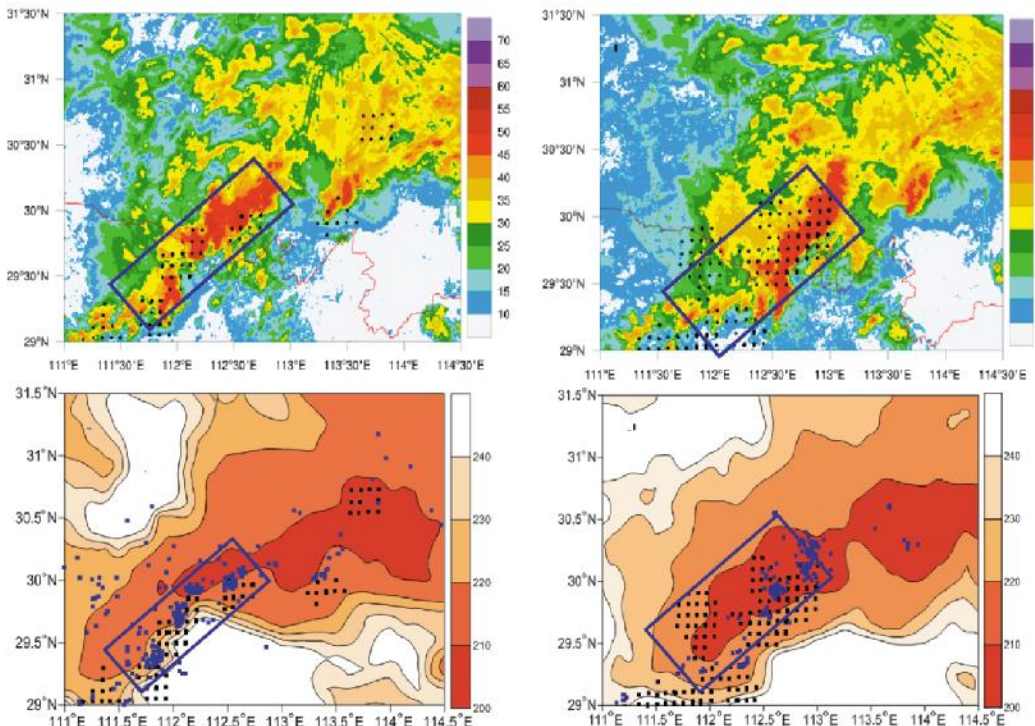


图5 雷达反射率和LMI闪电分布(a、b为21:18)和LMI、ADTD与TBB叠加图(c、d)
(a、c为20:18, b、d为21:18; 黑点表示LMI闪电, 蓝色方框表示LMI闪电分布区域; 图a、b阴影表示雷达反射率, 图c、d蓝点表示ADTD闪电, 阴影表示TBB)

叠加图,可以看出尽管两个时刻 B 区内 LMI 闪电对应的回波强度不强,但是均处在 $TBB \leq 220$ K 的范围中,表明虽然 B 区内的对流活动减弱,但是层状云区仍有一些对流云存在,因此出现了大片的 LMI 闪电活动。综上可见,在 TS 线状对流减弱阶段,有一部分 LMI 闪电出现在其前侧对流减弱区,还有一部分闪电出现在后侧层积混合云区。

3 不同演变阶段 LMI 闪电观测特征模型图

通过以上分析,给出了本过程 TS 型线状对流不同演变阶段 LMI 闪电观测特征模型图(图 7)。在 TS 型线状对流的发展阶段(图 7a),强的对流线位于系统移动的前方,该阶段 LMI 闪电大部位于线状对流主体前侧,对未来 0—1 h 内线状对流移动和强度演变具有引导作用;对流成熟阶段(图 7b),TS 型线状对流发展较强,LMI 闪电观测大部与对流主体位置较吻合,能够对流起到较好的监测作用;对流减弱阶段(图 7c),TS 型线状对流前侧对流线上的对流结构变得松散、强度减弱,同时后方的层积混合云区范围增大,LMI 闪电部分分布在线状对流前侧减弱的对流线中,一部分分布在线状对流后侧大片的层积混合云区中。由于不同演变阶段 LMI 闪电观测特

征不同,因此在 LMI 闪电数据的实际使用过程中,应依据 LMI 闪电观测的特征、大气环境场特征及中尺度数值模式的反射率因子预报等,分析线状对流演变的形态、阶段,并依据不同演变阶段 LMI 闪电分布特征及其对对流发展的作用,进行 LMI 闪电产品在对流天气中的应用。

4 小结

本文利用 FY-4A LMI 闪电资料、红外云顶亮温 TBB 资料、雷达及 ADTD 闪电等资料,研究了 2019 年 5 月 25 日一次 TS 型线状对流演变过程中,不同演变阶段 LMI 闪电观测的可信度及其特征,得出如下结论:

(1)通过多源数据分析和验证发现,本过程 TS 型线状对流演变过程中观测到的 LMI 闪电数据为真实闪电信号的可能性较大,业务适用性较高。总体看,在线状对流的不同演变阶段 LMI 闪电观测具有一定的时空连续性,LMI 闪电分布与 ADTD 闪电分布总体较为一致。

(2)在该 TS 型线状对流发展的不同阶段,LMI 闪电表现出不同的观测特征。对流发展阶段,LMI 闪电观测大部位于 TS 型线状对流主体前侧,略超前

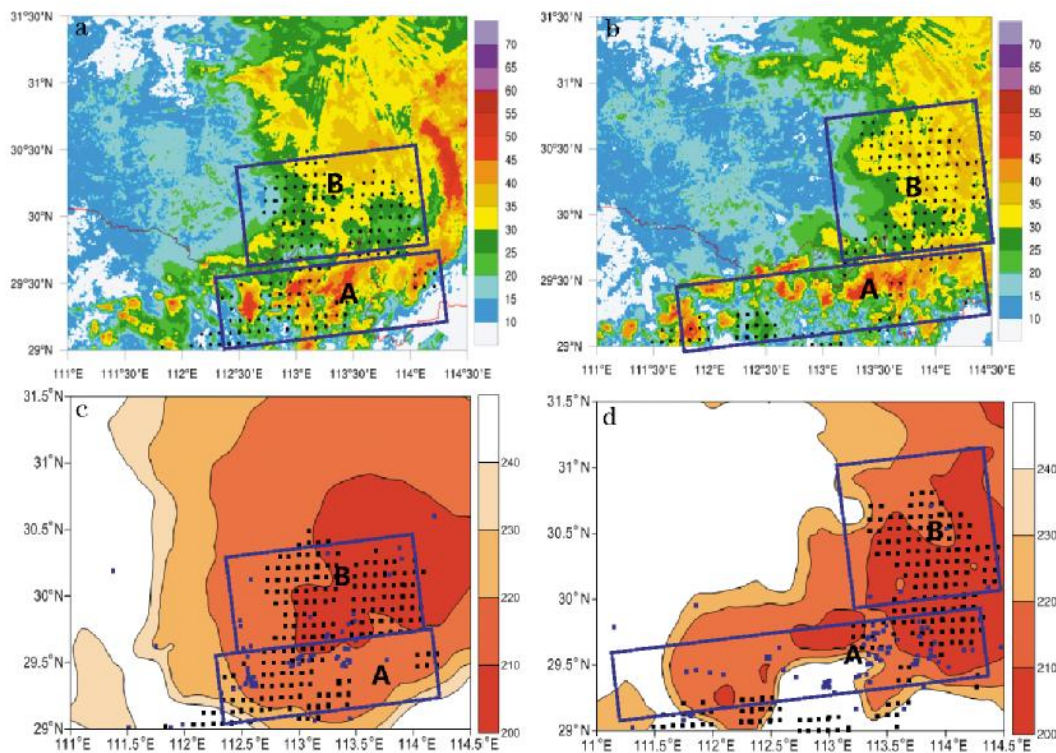


图 6 雷达反射率和 LMI 闪电分布(a 为 5 月 25 日 23:36,b 为 5 月 26 日 00:30;黑点表示 LMI 闪电,阴影表示雷达反射率,蓝色方框表示 LMI 闪电分布区域) LMI、ADTD 与 TBB 叠加图
(c 为 5 月 25 日 23:36,d 为 5 月 26 日 00:30;黑点表示 LMI 闪电,蓝点表示 ADTD 闪电,阴影表示 TBB,蓝色方框表示 LMI 闪电分布区域)

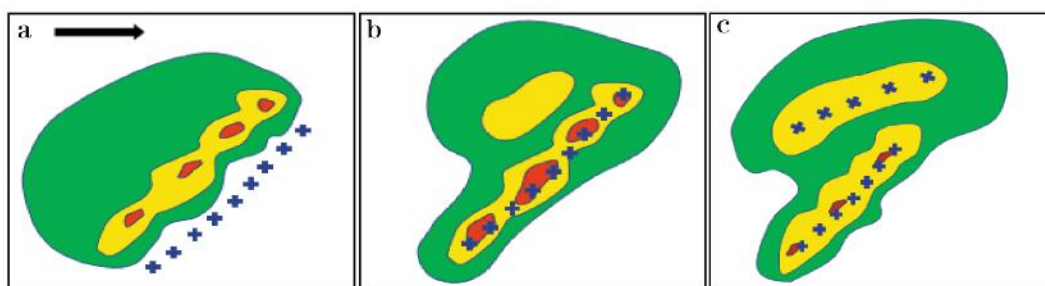


图7 线状对流不同演变阶段 LMI 闪电观测特征模型

(a 为对流发展阶段, b 为对流成熟阶段, c 为对流减弱阶段; 阴影表示反射率因子, 绿色表示 25~35 dBZ, 黄色表示 35~45 dBZ, 红色表示 >45 dBZ, + 表示 LMI 闪电分布, 黑色箭头表示线状对流移动方向)

于雷达回波, 对未来 0 h 内线状对流发展有引导作用; 对流成熟阶段, LMI 闪电观测与对流主体位置有较好的对应关系, 对对流发展有监测意义; 对流减弱阶段, LMI 闪电一部分分布在线状对流前侧减弱的对流线中, 另一部分则分布在线状对流后侧大片的层积混合云区中。

(3) 基于以上分析, 给出了此次 TS 型线状对流过程 LMI 闪电观测特征模型图, 能够为预报员有效判识不同对流发展阶段 LMI 闪电观测特征, 更加科学有效地利用 LMI 闪电产品进行对流天气的监测和预警, 提供一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 陈光舟, 王体健, 娄珊珊, 等. 安徽闪电分布特征和不稳定条件分析[J]. 气象科学, 2014, 34(5): 543-548.
- [2] 钱勇, 施俊杰, 王延慧, 等. 星地多源闪电资料在新疆地区的应用分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(3): 122-128.
- [3] 易笑园, 张义军, 王红艳, 等. 线状中尺度对流系统内多个强降水单体的结构演变及闪电活动特征 [J]. 气象学报, 2013, 71(6): 1035-1046.
- [4] RAKOV V A, UMAN MA. Lightning: physics and effects [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 545 - 546.
- [5] 马超, 周雅蔓, 李伟. 闪电定位资料在天山北坡强对流天气短临预警中的分析及应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 49-55.
- [6] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, GOODMAN S J. The detection of lightning from geostationary orbit[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94 (D11): 13329-13337.
- [7] YANG J, ZHANG Z, WEI C. et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun -4 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(8): 1637-1658.
- [8] 曹冬杰. 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展[J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 94-98.
- [9] 邹耀仁, 王赞, 王淑一, 等. 黄渤海地区 FY-4A 闪电成像仪(LMI)探测效果评估[J]. 干旱气象, 2021, 39(4): 662-669.
- [10] 曹冬杰, 陆风, 张晓虎, 等. 风云四号卫星闪电探测产品在强对流天气监测中的应用 [J]. 卫星应用, 2018(11): 18-23.
- [11] 支树林, 包慧濛, 李婕. FY-4A 卫星闪电资料在台风飊线天气监测中的应用能力分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 1178-1190.
- [12] HYU W, HUANG F, LIU R. Characteristics of lightning signals over the Tibetan Plateau and the capability of FY -4A LMI lightning detecton in the plateau [J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41 (12): 4605-4625.
- [13] 林小红, 张文娟, 范能柱, 等. FY-4 ALMI 观测的利奇马(2019)台前飊线闪电活动及其与对流演变的关系[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 873-886.
- [14] 张晓芸, 魏鸣, 潘佳文, 等. FY-4 闪电资料在厦门强降水监测预警中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5): 1082-1090.
- [15] 王清平, 吴晓京, 陈阳权, 等. FY-4A 卫星数据可视化及应用[J]. 气象科技, 2019, 47(3): 502-507.
- [16] 任素玲, 赵玮, 曹冬杰, 等. FY-4A 白天对流风暴和闪电产品在华北强雷暴天气分析中的应用[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(1): 33-46.
- [17] 徐国强, 黄守友, 赵晨阳. FY-4A 闪电资料在对流天气数值预报中的影响研究 [J]. 气象, 2020, 46 (9): 1165-1177.
- [18] 高文俊. 川西高原雷电监测数据应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [19] 吴涛, 黄小彦, 牛奔. 2012 年 7 月 12 日鄂东北准静止强降水中尺度对流系统分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(3): 228-238.
- [20] 侯淑梅, 郭俊建, 郭庆利, 等. 对流风暴的移动和演变对下游地区对流降水影响的个例分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(2): 58-69.

- [21] 侯淑梅,周成,韩永清,等.山东省线状中尺度对流系统与多单体风暴的合并特征[J].海洋气象学报,2020,40(1):57-65.
- [22] 刘一玮,孙建元,王颖,等.卫星遥感云分类和 TBB 产品在天津地区云状识别的应用分析[J].气象,2016,42(8):980-986.
- [23] PARKER M D,JOHNSON R H.Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J].Mon Wea Rev,128(10):3413-3436.
- [24] 王晓芳,崔春光,等.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I :组织类型特征[J].气象学报,2012,70(5):909-923.
- [25] 杨学斌,代玉田,吕伟琦.闪电发生的环境场特征及闪电活动的预报[J].海洋气象学报,2019,39(3):96-102.
- [26] 张琴,张晓,苟阿宁,等.山东两次强对流天气中尺度对流系统的闪电特征分析[J].科学技术与工程,2018,18(28):6-14.
- [27] 顾媛,魏鸣.南京一次雷雨的闪电特征与多尺度资料分析[J].气象科学,2013,33(2):146-152.
- [28] 陈英英,唐仁茂,李德俊,等.利用雷达和卫星资料对一次强对流天气过程的云结构特征分析[J].高原气象,2013,32(4):1148-1156.
- [29] 孙哲,魏鸣.春季与夏季两次雷暴大气结构及地闪特征对比[J].大气科学学报,2016,39(2):260-269.

LMI Lightning Observation Characteristics in Different Evolution Stages of a TS Type Linear Convection

ZHANG Pingping^{1,2}, LIN Xiudong², ZHANG Liping², LIAN Fan², LIU Wenting³

(1.Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong,Jinan 250031,China;

2.Weihai Meteorological Bureau, Weihai 264200, China;

3.Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China)

Abstract Using FY-4A lightning imager (LMI) data, radar combined reflectivity factor data, ground-based lightning location data (ADTD), FY-4A cloud top brightness temperature data (TBB) and other conventional observation data, the reliability and observation characteristics of LMI lightning data in three different evolution stages of a trailing stratiform (TS) linear convection in Hubei province in 2019 were analyzed. The results show that LMI lightning observation has a certain degree of space-time continuity in different evolution stages of linear convection, and the distribution of LMI lightning is generally consistent with that of ADTD lightning; In the stage of convection development, LMI lightning observation is mostly located in the front of the TS type linear convection leading convective line, which is ahead of the convective line, indicating the convection development in the next 0-1 hours in advance; In the mature stage of convection, LMI lightning observation is often close to leading convection line, which is significant for monitoring the development of linear convection; In the stage of convection weakening, a part of LMI lightning is located in the weakened leading convective line, and the other part is located in the stratiform mixed cloud area behind the linear convection. Finally, the model graph of LMI lightning observation characteristics in different evolution stages of TS linear process were given, which provides some reference for the application of LMI lightning products in convective weather monitoring and early warning.

Key words lightning mapping imager; linear convection; monitoring and warning